

直压立式纱网沙障不同取样季节输沙量变化特征

闫德仁, 杨制国, 高海燕, 黄海广, 胡小龙

(内蒙古林业科学研究院/沙地生物资源保护与培育国家林业和草原局重点实验室, 中国, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: [目的] 对不同规格纱网沙障春季、夏秋季的输沙量变化特征进行定位连续测定, 为进一步评价纱网沙障的固沙效果提供科学依据。[方法] 采用野外定位、定期观测方法, 研究不同季节纱网沙障的输沙量变化特征。[结果] 无论是春季, 还是夏秋季, 设置 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$, $3\text{ m}\times 3\text{ m}$, $3\text{ m}\times 4\text{ m}$ 和 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$ 的纱网沙障对风沙流的拦截效果随着网格变小而增加, 且输沙量随高度变化趋势线均呈现指数关系。来自西北风方向的输沙量大于东南风方向的输沙量, 且春季输沙量大于夏秋季输沙量。和对照相比, 春季 $3\text{ m}\times 4\text{ m}$ 纱网沙障 0—60 cm 高度拦截的净输沙量降低了 85.98%, 而夏秋季降低了 79.56%。[结论] 纱网沙障输沙量主要集中在地表 20 cm 及以下高度范围, 并随着纱网沙障规格增加其降低输沙量能力减少。设置纱网沙障能有效减少风沙流危害。

关键词: 纱网沙障; 输沙量; 乌兰布和沙漠

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)04-0129-06

中图分类号: S775, S157

文献参数: 闫德仁, 杨制国, 高海燕, 等. 直压立式纱网沙障不同取样季节输沙量变化特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 129-134. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.017; Yan Deren, Yang Zhiguo, Gao Haiyan, et al. Variation characteristics of sediment transport for a vertical gauze sand barrier during different sampling seasons [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 129-134.

Variation Characteristics of Sediment Transport for a Vertical Gauze Sand Barrier During Different Sampling Seasons

Yan Deren, Yang Zhiguo, Gao Haiyan, Huang Haiguang, Hu Xiaolong

(Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences/Key Laboratory of Conservation and Cultivation of Desert Biological Resources of State Forestry and Grassland Administration, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: [Objective] The variation characteristics of sediment transport for different specifications of gauze sand barriers in spring, summer and autumn were observed continuously in order to provide a scientific basis for further evaluation of the sand-fixing effect of gauze sand barriers. [Methods] Field positioning and regular observation methods were used to determine the amount of sediment transport for gauze sand barriers in different seasons in the Ulanbuh Desert. [Results] The $2\text{ m}\times 2\text{ m}$, $3\text{ m}\times 3\text{ m}$, $3\text{ m}\times 4\text{ m}$, and $4\text{ m}\times 4\text{ m}$ gauze sand barriers were set to intercept wind and sand flow, and the effects increased as grid-spacing became smaller. Sediment load changed with height above the soil surface in an exponential relationship in all three seasons. The amount of sediment transported by the northwest wind was more than the amount transported by the southeast wind. The amount of sediment transported in spring was more than the amount transported in summer and autumn. Compared with the control, the net sediment transport intercepted in the 0—60 cm height range was reduced 85.98% by the $3\text{ m}\times 4\text{ m}$ gauze sand barrier in spring, and the net sediment transport in this height range was reduced 79.56% in summer and autumn. [Conclusion] Sediment transport of the gauze sand barrier was mainly concentrated in the 20 cm height range above the ground surface. As the size of the gauze sand barrier increased, its ability to reduce the amount of sediment transport decreased. Gauze sand barriers can be set to effectively reduce the hazards of wind-sand flows.

Keywords: gauze sand barrier; sediment transport; Ulanbuh Desert

收稿日期: 2022-01-10

修回日期: 2022-03-11

资助项目: 内蒙古科技攻关计划项目“黄河沿岸流动沙丘综合固沙关键技术与示范”(2020GG0125); 多伦浑善达克沙地国家定位观测站项目

第一作者: 闫德仁(1962—), 男(汉族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士, 研究员, 主要从事沙漠治理方面研究。Email: nmglkyydr@163.com。

沙障是固定流动沙地、控制风蚀危害的主要工程技术措施之一,并在工程固沙生产实践中得到广泛的应用。所以,诸多研究者从不同方面开展了沙障类型及其固沙成效的研究,并取得丰硕的成果^[1-2]。屈建军等^[3]认为草方格沙障是近地表防止风沙危害应用最为广泛的沙障类型,且由于涡旋气流作用在沙障内进行沙物质的非堆积搬运。高永等^[4]测定了沙柳沙障输沙率与风速关系,发现沙障规格不同其防护效益不同。党晓宏等^[5]研究表明 PLA 沙障改变了沙丘不同部位近地表风沙流结构。高天笑等^[6]研究了 10—20 cm 高度的羽翼袋沙障对输沙量的影响,结果表明其输沙量比对照降低 81.4%~88.9%。聚乙烯抗老化纱网沙障是近几年内蒙古林业科学研究院科技人员研发的一种疏透型沙障,具有野外施工方便、使用寿命长、材质轻、运输便利、适合机械化铺设等优点,在内蒙古五大沙地和乌兰布和沙漠进行了应用示范,对固沙植被建立发挥了明显作用^[7-9]。但有关纱网沙障设置后对不同季节输沙量的影响研究一直没有开展。为此,2021 年,本研究结合内蒙古沿黄段乌兰布和沙漠治理项目,对不同规格纱网沙障春季、夏秋季的输沙量变化特征进行定位连续测定,希望能够为进一步评价纱网沙障的固沙效果提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古黄河西岸乌兰布和沙漠刘拐子沙头,地理坐标为 40°09′58.75″N, 106°50′28.38″E。气候属于中温带干旱季风气候区,盛行西北风、西风。年平均降水量 142.7 mm,年均蒸发量 2 397.6 mm,年平均气温 8.0℃,年平均风速 2.8 m/s。研究地和黄河西岸毗邻,流动沙丘密度 0.8~0.9,天然植被覆盖度小于 5%,每年大风季节风沙直接吹入黄河,是沿黄河段风沙危害最严重的区域之一。

2 研究方法

2.1 直压立式纱网沙障铺设

沙障材料为抗老化白色聚乙烯(polyethylene,简称 PE)环保纱网,纱网网孔尺寸 0.85~2.0 mm,纱网宽 60 cm。按照流动沙丘坡向、坡位相近原则,在流动沙地铺设直压立式纱网沙障。从成本和固沙成效综合考虑,设计的沙障规格为 2 m×2 m,3 m×3 m,3 m×4 m 和 4 m×4 m 网格。铺设沙障时,将网片平铺,然后用圆头铁锹沿平铺网片中线部位下压,连续两次下压之间不留空隙,使网片两端向上翘起形成直立皱褶(图 1),外露地表高度 10—15 cm。



图 1 直压立式纱网沙障铺设工作

2.2 输沙量测定

2021 年 4 月 23 日在不同网格的纱网沙障中心部位(图 2)设置自研的集沙仪(ZL202021969147.9),集沙袋入口为 1 cm×1 cm,风沙入口方向为西北向,集沙袋共分 4 层,距离地面高度分别为 10, 20, 40 和 60 cm。同时,在 3 m×4 m 网格沙障内设置东南风入口的集沙仪,探讨西北风、东南风对输沙量的影响。集沙仪安置后,第一次取样时间为 6 月 22 日,第二次取样时间为 10 月 13 日。采集完集沙袋内沙量样品,带回室内,测定烘干重,并计算输沙量 $[\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})]$ 。同时以没有设置沙障的流动沙丘为对照样地,对照样地位于纱网沙障西南侧 100 m 处的流动沙丘。

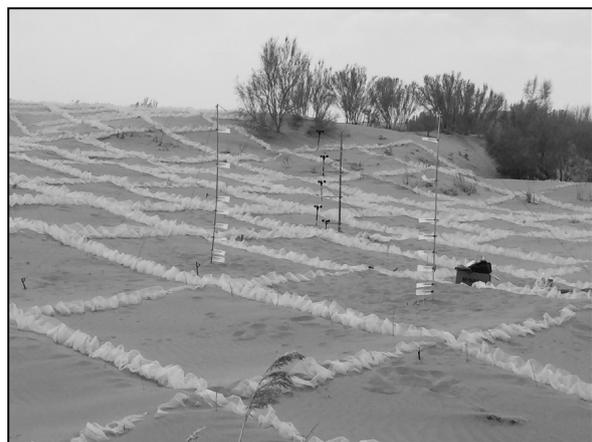


图 2 设置集沙仪位置

3 结果与分析

3.1 不同取样季节输沙量的变化

输沙量是指风沙流在单位时间,通过单位断面所搬运的沙粒数量,又称风沙流的固体流量^[10]。所以,输沙量的大小反映了风速和风沙流中含沙量变化的

关系,常用于评价沙障对风沙流的拦沙效果。当年春季设置完沙障后,经过近60 d(4月23日至6月22日)的连续数据采集,无论是对照样地,还是设置不同规格纱网沙障,输沙量随高度变化趋势线均呈现指数或幂函数关系,但是根据 R^2 值最大原则,我们选择的输沙量随高度变化趋势线均为指数关系(表1),且输沙量主要集中在距离地面20 cm以下的高度通过,并以距离地面10 cm高度输沙量为最大(图3—5)。这和其他研究者的结论几乎一致。例如,Chepil等^[11]研究表明,距离地表0—5 cm范围搬运的沙物质占总搬运量60%~80%;吴正^[12]的观测结果表明,风沙流中的沙物质90%以上分布在30 cm以下的高度;毛东雷^[13]研究表明,30 cm高度范围内的输沙量占总输沙量64.30%~83.13%;张正偲等^[14]指出,在腾格里沙漠地表10 cm高度范围的输沙量占总输沙量的95.46%。从图3可以看出,春季对照样地10 cm高度输沙量为259.97 mg/(cm²·h),20 cm高度为67.20 mg/(cm²·h),分别占0—60 cm高度范围总累计输沙量的73.14%和19.13%,两者合计占0—60 cm高度范围总累计输沙量的92.27%。

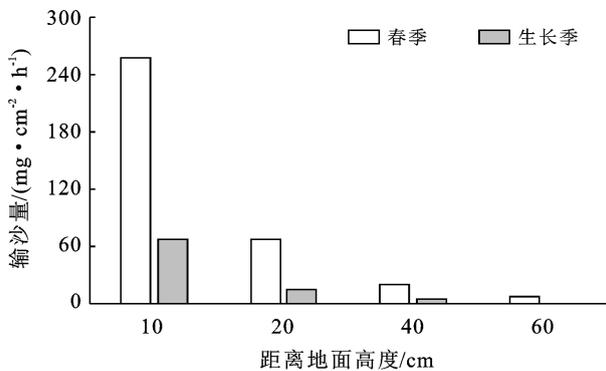


图3 春季和夏秋季对照样地输沙量的变化

从图4中看出,春季设置沙障后,不同规格的PE纱网沙障对拦截距离地面不同高度输沙量的效果明显。其中,4 m×4 m PE纱网沙障10 cm,20 cm高度输沙量分别为74.92,38.81 mg/(cm²·h),两者合计占0—60 cm高度范围总累计输沙量的91.11%,而对照样地(图3),春季10 cm,20 cm高度输沙量分别为259.97,67.20 mg/(cm²·h),所以,和对照样地的数据变化,可以看出4 m×4 m PE纱网沙障的固沙效果明显增加。3 m×4 m PE纱网沙障10 cm,20 cm高度输沙量分别为61.99,35.01 mg/(cm²·h),合计占60 cm高度范围累计输沙量的87.71%。3 m×3 m PE纱网沙障10 cm,20 cm高度输沙量分别为32.42,18.49 mg/(cm²·h),合计占60 cm高度范围

累计输沙量的82.63%。2 m×2 m PE纱网沙障10 cm,20 cm高度输沙量分别为8.58,4.65 mg/(cm²·h),合计占60 cm高度范围累计输沙量的78.46%。说明,春季设置沙障后,距离地面20 cm及以下高度的输沙量不仅比对照样地降低,而且占0—60 cm高度范围的累计总输沙量也同时降低,表明设置沙障的固沙效果主要是降低近地表的输沙量,并进一步控制风蚀危害。

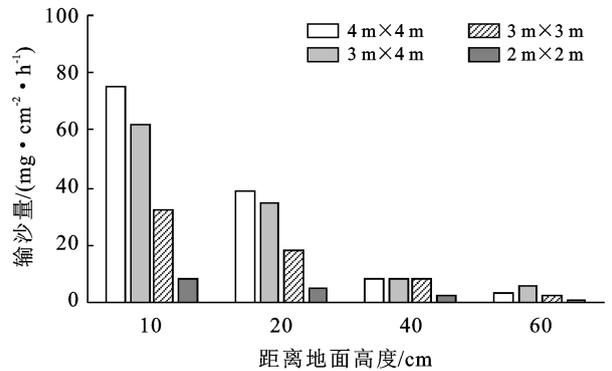


图4 春季不同规格纱网沙障输沙量的变化

此外,和对照相比,春季不同规格纱网沙障对拦截0—60 cm高度范围内的风沙效果同样显著。其中,4 m×4 m规格PE纱网沙障0—60 cm高度累计输沙量比对照样地净减少64.47%;3 m×4 m PE纱网沙障累计输沙量比对照样地净减少68.52%;3 m×3 m PE纱网沙障累计输沙量比对照样地净减少82.46%;2 m×2 m PE纱网沙障累计输沙量比对照样地净减少95.20%。说明随着纱网沙障规格的降低,对降低0—60 cm高度范围输沙量的效果更加明显,同时,也表明设置纱网沙障对拦截近地表风沙具有明显的效果。其原因,主要是由于PE纱网材料属于软体透风材料,能够随风运动前后摆动,对空气流的扰动作用更加强烈,其降低风速的效果也更好。闫德仁等^[9]研究表明,在相同风速下,随着纱网沙障规格的降低,其防风效能逐渐提高,例如,6 m×6 m纱网沙障平均防风效能25.52%,4 m×4 m纱网沙障平均防风效能44.89%,2 m×2 m纱网沙障平均防风效能为76.11%。说明纱网沙障设置规格是影响其防风效能的重要因素,或者说,沙障网格小其防风效能相对增加,进而对降低输沙量的效果也更好。

结合图4沙障输沙量的变化特征,从图5可以看出,夏秋季不同规格沙障对输沙量的影响同样反映出了类似的变化特征,即不同规格纱网沙障输沙量随高度变化拟合曲线均呈现指数关系(表1)。从0—60 cm高度范围内的拦截风沙效果看,4 m×4 m纱

网沙障 0—60 cm 高度范围累计输沙量比对照样地净减少 56.80%；3 m×4 m 纱网沙障净减少 67.67%；3 m×3 m PE 纱网沙障净减少 68.29%；2 m×2 m 纱网沙障净减少 96.32%。输沙量主要发生在 20 cm 高度及其以下的范围，且随着沙障规格的降低，其输沙量亦降低。在夏秋季（6 月 22 日至 10 月 13 日），沙障内 10 cm 高度输沙量明显低于对照样地，同时，对照样地的输沙量（累计量、分层输沙量）也明显低于春季对照样地的输沙量。其原因主要和本区春季风速变化特征和植物生长季风速本身就小等因素有关。

表 1 不同季节纱网沙障输沙量随高度变化的趋势线

时间	沙障规格	拟合曲线	R ² 值	沙障规格	拟合曲线	R ² 值
春季	CK	$y = 834.78e^{-1.227x}$	0.999	4 m×4 m	$y = 266.68e^{-1.117x}$	0.978
	3 m×4 m	$y = 157.20e^{-0.875x}$	0.952	3 m×3 m	$y = 88.289e^{-0.851x}$	0.973
	2 m×2 m	$y = 17.076e^{-0.66x}$	0.998			
夏秋季	CK	$y = 384.65e^{-1.614x}$	0.974	4 m×4 m	$y = 62.626e^{-0.941x}$	0.953
	3 m×4 m	$y = 39.654e^{-0.875x}$	0.973	3 m×3 m	$y = 242.8e^{-1.933x}$	0.853
	2 m×2 m	$y = 6.2037e^{-1.052x}$	0.972			

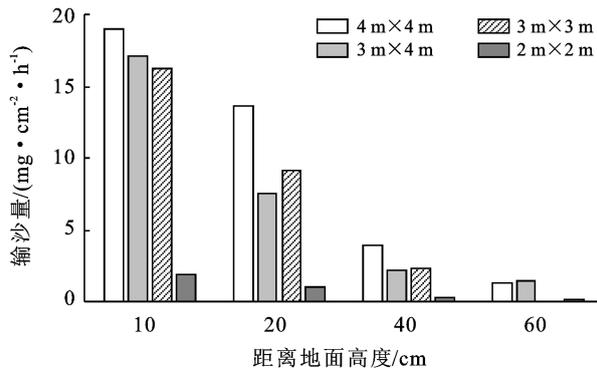


图 5 夏秋季不同规格沙障对输沙量的影响

3.2 不同风向输沙量的变化特征

风是影响风沙流含沙量的主要因素之一。罗凤敏等^[15]研究表明乌兰布和沙漠春季输沙率最高，沙物质输移方向主要是向东南偏东方向。杨迎等^[17]研

例如，罗凤敏等^[15]研究表明，该区起沙风的月均风速在 6.27~7.30 m/s，春季平均风速最高，为 7.10 m/s，夏季平均风速为 6.64 m/s，春季起沙风频率最高，为 24.63%，夏季为 18.06%；而相应的输沙量变化具有明显的季节特征，即春季输沙率显著高于其他季节。春季输沙率最高，为 16.50 kg/(m·d)，占总输沙率的 47.15%，夏季最小，为 4.34 kg/(m·d)。陈新闯^[16]研究表明，乌兰布和沙漠沿黄段多年平均风速 3.7 m/s，且主要集中于 3—5 月，沙丘移动受季风影响较大，前移主要发生在西北风盛行的 3—5 月。

究认为，本区春季起沙风占全年起沙风频率的 34.74%，西北风占主导地位，发生频率为 39.35%，夏季起沙风占全年起沙风频率的 26.13%，东北风占主导地位，发生频率为 30.80%。我们选择 3 m×4 m 纱网沙障为例，测定了不同取样季节，西北风向和东南风向输沙量的变化（表 2—3）。结果表明，来自西北风方向的输沙量大于东南风方向的输沙量，且春季输沙量大于夏秋季输沙量。当然，设置纱网沙障后对降低输沙量也具有明显的效果。从表 2 中可以看出，春季 3 m×4 m 网格沙障 20 cm 及其以下高度的净输沙量占 0—60 cm 高度累计净输沙量的 97.51%，对照样地为 97.47%，并且，设置沙障后 0—60 cm 高度拦截的净输沙量比对照样地净减少了 248.50 mg/(cm²·h)。和对照相比，3 m×4 m 网格沙障 0—60 cm 高度输沙量降低了 85.98%，固沙效果显著。

表 2 春季不同风向输沙量变化特征

mg/(cm²·h)

距离地面高度/cm	3 m×4 m 沙障			对照		
	东南风向	西北风向	净输沙量	东南风向	西北风向	净输沙量
10	25.14	61.99	36.85	33.43	256.98	223.55
20	32.35	35.01	2.65	9.03	67.19	58.16
40	7.36	8.15	0.78	8.35	12.74	4.39
60	5.22	5.44	0.23	7.40	10.31	2.92
合计	70.07	110.60	40.51	58.21	347.22	289.01

同样，从表 3 中也可以看到上述变化特征，夏秋季 3 m×4 m 网格沙障的净输沙量比对照样地净减

少了 53.69 mg/(cm²·h)。和对照相比，降低了 79.56%。并且，夏秋季对照样地的净输沙量比春季

对照样地降低了 $221.53 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 。说明夏秋季因风速较少、刮风次数也少,对照样地输沙量也相应地有所降低。这样夏秋季沙障对输沙量的影响必然

有所表现,即设置 $3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 网格沙障后,夏秋季净输沙量比春季降低 $26.72 \text{ mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$,降低比例达到 65.95% 。

表 3 夏秋季不同风向输沙量变化特征

 $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$

距离地面 高度/cm	3 m×4 m 沙障			对照		
	东南风向	西北风向	净输沙量	东南风向	西北风向	净输沙量
10	6.54	17.11	10.57	26.93	75.73	48.81
20	4.18	7.52	3.34	6.41	24.05	17.63
40	2.46	2.18	-0.28	4.13	4.87	0.74
60	1.24	1.40	0.16	2.05	2.35	0.30
合计	14.42	28.21	13.79	39.51	107.00	67.48

4 讨论

沙障对降低流动沙地输沙量的影响具有重要的作用,并通过改变地表的蚀积状况,减轻了植物遭受风蚀、沙埋、沙割的危害,有利于植物在流沙上定居。对风沙流运移特征的研究表明^[10],风沙流中的含沙量随垂直高度增加而减少,绝大部分沙粒是在贴近地面的 30 cm 高程内,主要是在 0—10 cm 高程的气流中输移,且风速增大,输沙量显著增加;拜格诺发现沙子最大跃移高度为 9 cm;切皮尔发现 90% 的风沙运移高度低于 31 cm,而 0—5 cm 高程内搬运的物质占总量的 60%~80%;吴正、齐之尧的野外观测表明,气流搬运的沙量绝大部分(90%以上)是在离地表 30 cm 的高程内通过的,其中又特别集中分布在 0—10 cm 的气流层内(约 80%)。此外,国内的其他研究者也有类似的研究结论。例如,毛东雷^[13]认为,30 cm 高度范围内的输沙量占总输沙量 64.30%~83.13%;张正偲等^[14]在腾格里沙漠研究表明,地表 10 cm 高度范围的输沙量占总输沙量的 95.46%;徐军等^[18]研究表明,乌兰布和沙漠流动沙丘表面 10 cm 以下高度内的输沙量占总输沙量 70%,这些研究结论说明风沙流运动是一种贴近地表的沙物质搬运过程。所以,本文中设置外露地表高度 10—15 cm 的纱网沙障对拦截 20 cm 以下高度的风沙流的输沙量具有明显的作用。此外,关于近地层输沙量随高度的变化规律主要表现为指数函数和幂函数两种拟合曲线。本研究根据 R^2 值最大原则,表明不同规格纱网沙障的输沙量随高度变化趋势线均呈现指数关系。这和其他研究者结论不尽相同,但汪季等^[19]研究指出,流动沙地近地表沙尘相对含量随高度的分布都呈指数函数关系;张正偲^[20]研究表明沙尘水平通量随高度变化为指数函数;Goossens^[21]也认为是指数函数关系。但无论是倾向于哪种函数关系,共同的规律是风

沙流中沙尘质量随高度的增加而减少,同时,也表明在不同的观测期,沙尘质量随高度的变化规律并不完全一样。

关于纱网沙障固沙效果,本研究采用定位、连续收集 4 种规格纱网沙障的输沙量,结果表明,无论是春季,还是夏秋季,随着纱网沙障网格变小而输沙量降低,固沙能力增加。例如,春季,4 m×4 m 纱网沙障,10 cm 高度的输沙量比对照样地降低 70.85%,3 m×4 m,3 m×3 m 和 2 m×2 m 纱网沙障分别比对照样地输沙量降低 75.88%,87.39%和 96.66%;同样,4 m×4 m 纱网沙障,20 cm 高度的输沙量比对照样地降低 42.25%,3 m×4 m,3 m×3 m 和 2 m×2 m 纱网沙障分别比对照样地输沙量降低 47.91%,72.48%和 93.08%。夏秋季,4 m×4 m 纱网沙障,10 cm 高度的输沙量比对照样地降低 71.88%,3 m×4 m,3 m×3 m 和 2 m×2 m 纱网沙障分别比对照样地输沙量降低 74.61%,75.96%和 97.23%;4 m×4 m 纱网沙障,20 cm 高度的输沙量比对照样地降低 6.40%,3 m×4 m,3 m×3 m 和 2 m×2 m 纱网沙障分别比对照样地输沙量降低 48.14%,37.31%和 92.77%。说明,纱网沙障网格是影响其防风效能的重要因素,此外,纱网沙障的固沙效果还和这种软质纱网材料的通风特性和随风摆动扰动风场的作用有关。例如,张克存等^[22]利用风洞模拟研究表明不同孔隙度的尼龙网沙障不仅直接影响沙颗粒的穿透能力,而且还改变气流的紊动特性,最终对沙障的防护效益产生至关重要的影响。何志辉等^[23]认为风速的降低程度与纱网的孔隙结构密切相关,其中,纱网孔隙均匀分布其防风阻沙效果最好。高天笑等^[6]研究表明设置 10—20 cm 高的羽翼袋沙障,其输沙量比对照降低 81.44%~88.92%。党晓宏等^[5]研究表明,设置 PLA 材料沙袋沙障后,0—4 cm 高度层输沙量减少,4—30 cm 高度层增加。闫德仁等^[24]研究表明在

流动沙地设置不同规格 PE 纱网沙障,能够显著降低 0—20 cm 以下风沙流中的输沙量,减少风沙危害。袁立敏等^[25]研究表明沙袋沙障处于浅埋、深埋状态时,与裸露状态相比,其对过境风沙的拦截能力显著降低。杜鹤强等^[26]研究结果表明,沙丘各部位 90% 以上的输沙量集中到 10 cm 高度以下。闫德仁等^[27]对 PE 纱网沙障的风洞试验研究表明,当沙障高度 20 cm 时,沙障背风侧范围形成弱风区,并在沙障位置(0 距离)上方及沙障背风侧 10 cm 高空范围内形成多个高风速涡旋,说明直压立式纱网随风运动前后摆动对空气中气流的扰动作用更加强烈,其降低风速的效果也更好。上述的相关结果和本研究中不同规格纱网沙障显著降低近地表 20 cm 以下高度输沙量的结论基本一致,并且,在流动沙地设置 PE 纱网沙障具有野外施工方便,使用寿命长,材质轻,运输便利,适合机械化铺设等优点。

5 结论

(1) 不同规格纱网沙障的输沙量主要集中在距离地面 20 cm 以下的高度通过,并以距离地面 10 cm 高度输沙量为最大。同时,根据 R^2 值最大原则,设置不同规格的纱网沙障,其输沙量随高度变化拟合曲线呈现指数关系,纱网沙障对风沙流的拦截效果随着网格变小而增加。

(2) 不同取样季节,纱网沙障固沙效果不同。和对照相比,春季 4 m×4 m 纱网沙障 0—60 cm 高度范围累计输沙量净减少 64.47%; 3 m×4 m 纱网沙障净减少 68.52%; 3 m×3 m PE 纱网沙障净减少 82.46%; 2 m×2 m 纱网沙障净减少 95.20%。夏秋季 4 m×4 m 纱网沙障 0—60 cm 高度范围累计输沙量净减少 56.80%; 3 m×4 m 纱网沙障净减少 67.67%; 3 m×3 m PE 纱网沙障净减少 68.29%; 2 m×2 m 纱网沙障净减少 96.32%。

(3) 无论是设置沙障后的春季,还是夏秋季,来自西北风方向的输沙量大于东南风方向的输沙量,且春季输沙量大于夏秋季输沙量。和对照相比,春季 3 m×4 m 纱网沙障在 0—60 cm 高度范围拦截的净输沙量降低了 85.98%,而夏秋季降低了 79.56%,表明纱网沙障对输沙量的影响和不同时期风沙发生的程度有关。

[参 考 文 献]

[1] 丁新辉,刘孝盈,刘广全.我国沙障固沙技术研究进展及展望[J].中国水土保持,2019,442(1):35-37.
[2] 张利文,周丹丹,高永.沙障防沙治沙技术研究综述[J].

内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2014,43(3):363-369.

- [3] 屈建军,凌裕泉,俎瑞平,等.半隐蔽格状沙障的综合防护效益观测研究[J].中国沙漠,2005,25(3):329-335.
[4] 高永,邱国玉,丁国栋,等.沙柳沙障的防风固沙效益研究[J].中国沙漠,2004,24(3):365-370.
[5] 党晓宏,高永,虞毅,等.可降解纤维沙障控制风蚀沙埋的作用规律[J].科技通报,2015,31(5):41-46.
[6] 高天笑,王涛,杨文斌,等.低覆盖度羽翼袋沙障防风积沙效应的风洞试验[J].中国沙漠,2019,39(6):177-183.
[7] 闫德仁,胡小龙,黄海广,等.纱网沙障对植被恢复的影响[J].内蒙古林业科技,2017,43(3):1-4.
[8] 闫德仁,胡小龙,黄海广,等.纱网沙障输沙量风洞模拟实验研究[J].内蒙古林业科技,2016,42(3):1-4.
[9] 闫德仁,袁立敏,黄海广,等.乌兰布和沙漠流动沙丘纱网沙障防风效能研究[J].水土保持研究,2021,28(2):198-202.
[10] 姚云峰,王林和,马玉明,等.风沙运动学[M].内蒙古呼和浩特:远方出版社,2004.
[11] Chepil W S, Woodruff N P. Sedimentary characteristics of dust storms (Part II): Visibility and dust concentration [J]. American Journal of Science, 1957,255(2):104-114.
[12] 吴正.风沙地貌学[M].北京:科学出版社,1987.
[13] 毛东雷.策勒绿洲—沙漠过渡带风沙前沿风沙流结构研究[J].现代农业科技,2011,(15):266-269.
[14] 张正偲,董治宝,赵爱国,等.沙漠地区风沙活动特征:以中国科学院风沙观测场为例[J].干旱区研究,2007,24(4):550-555.
[15] 罗凤敏,高君亮,辛智鸣,等.乌兰布和沙漠东北缘起沙风况及输沙特征[J].农业工程学报,2019,35(4):145-152.
[16] 陈新闻.乌兰布和沙漠黄河沿岸磴口段风积沙运移过程与规律[D].山东泰安:山东农业大学,2016.
[17] 杨迎,吕萍,马芳,等.乌兰布和沙漠西南部风况对穹状沙丘形成的影响[J].中国沙漠,2021,41(2):19-26.
[18] 徐军,章尧想,郝玉光,等.乌兰布和沙漠流动沙丘风沙流结构的定量研究[J].中国农学通报,2013,29(19):62-66.
[19] 汪季,胡志敏.近地表风沙流结构对不同植被覆盖度的响应[J].干旱区资源与环境,2005,19(5):30-33.
[20] 张正偲,董治宝,赵爱国.腾格里沙漠东南部近地层沙尘水平通量和降尘量随高度的变化特征[J].环境科学研究,2010,23(2):165-169.
[21] Goossens D. The granulometrical characteristics of a slowly-moving dust cloud [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1985,10(4):353-362.

- [5] 赵平,徐正宣,唐林,等.埃塞俄比亚黑棉土胀缩特性及大气影响深度研究[J].铁道工程学报,2014,31(4):46-50.
- [6] 赵艳林,曾召田,吕海波.大气作用下膨胀土地基的水分迁移与胀缩变形分析[J].防灾减灾工程学报,2011,31(6):659-665.
- [7] 孔令伟,陈建斌,郭爱国,等.大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J].岩土工程学报,2007,29(7):1065-1073.
- [8] 郑硕,黎凤林,杨超炜.特殊土边坡的植被防护工程及景观研究[J].公路工程,2020,45(5):234-238.
- [9] Likitlersuang S, Kounyou K, Prasetyaningtiyas G A. Performance of geosynthetic cementitious composite mat and vetiver on soil erosion control [J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(6): 1410-1422.
- [10] Pan Yi, Chen Yongping, Zhang Tongxin, et al. Laboratory study on erosion of vegetated HPTRM system under high-speed open-channel flow [J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 2017, 144(1): 04017038.
- [11] Yuan Saiyu, Tang Hongwu, Li Lin, et al. Overtopping erosion and failure mechanism of earthen levee strengthened by vegetated HPTRM system [J]. Ocean Engineering, 2015, 96: 139-148.
- [12] 裴圣瑞.新型锚固加强植被系统加固南宁膨胀岩的试验研究[D].广西南宁:广西大学,2014.
- [13] 康春艳.南宁膨胀岩边坡高性能植被保护垫系统冲刷试验研究[D].广西南宁:广西大学,2016.
- [14] 鲜少华.锚固加强植被系统防护膨胀土边坡坡面效果的研究[D].广西南宁:广西大学,2016.
- [15] Mehrjardi G T, Behrad R, Tafreshi, S N M. Scale effect on the behavior of geocell-reinforced soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019,47(2): 154-163.
- [16] 侯兆霞.特殊土地基[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [17] 肖衡林,张晋锋.三维土工网垫固土植草试验研究[J].公路,2005(4):163-166.
- [18] Ng C W W, Zhan L T, Bao C G, et al. Performance of anunsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration [J]. Geotechnique, 2003, 53 (2): 143-157.
- [19] Guo WenZhao, Chen ZhuoXin, Wang Wenlong, et al. Telling a different story: The promote role of vegetation in the initiation of shallow landslides during rainfall on the Chinese Loess Plateau [J]. Geomorphology, 2020, 350: 106879.
- [20] Xie Canrong, Ni Pengpeng, Xu Meijuan, et al. Combined measure of geometry optimization and vegetation for expansive soil slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 123: 103588.
- [21] 李润发,王桂尧,张永杰,等.种植香根草根系对膨胀土特性影响的试验研究[J].公路交通科技,2020,37(5): 43-52.
- [22] 鲜少华,许英姿,姚海林,等.锚固加强植被系统约束膨胀土变形模型试验研究[J].岩土力学,2017,38(S1): 158-166.
- [23] 周婷,张寅生,高海峰,等.青藏高原高寒草地植被指数变化与地表温度的相互关系[J].冰川冻土,2015,37(1):58-69.
- [24] Wang Guiyao, Huang Yonggang, Li Runfa, et al. Influence of vetiver root on strength of expansive soil-experimental study [J]. PLoS One, 2020, 15 (12): e0244818.
- [25] Tan Huiming, Chen Fumao, Chen Jia, et al. Direct shear tests of shear strength of soils reinforced by geomats and plant roots [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019,47(6): 780-791.

(上接第 134 页)

- [22] 张克存,屈建军,俎瑞平.下垫面条件对风沙活动层气流紊动性影响的风洞模拟[J].水土保持通报,2004,24(3):1-4.
- [23] 何志辉,李生字,王海峰,等.塔克拉玛干沙漠 4 种结构尼龙阻沙网的防风阻沙效益对比[J].干旱区研究,2014,31(2):369-374.
- [24] 闫德仁,袁立敏,黄海广,等.直压立式纱网沙障对近地表输沙量及风速的影响[J].中国沙漠,2020,40(2): 79-85.
- [25] 袁立敏,黄海广,闫德仁,等.不同沙埋程度下带状沙障的防风固沙效果研究[J].农业工程学报,2019,35(16): 172-179.
- [26] 杜鹤强,薛嫻,孙家欢.乌兰布和沙漠沿黄河区域下垫面特征及风沙活动观测[J].农业工程学报,2012,28(22):156-165.
- [27] 闫德仁.沙漠化土地综合治理技术研究[M].内蒙古呼和浩特:内蒙古大学出版社,2019.